

# Полупроводники.

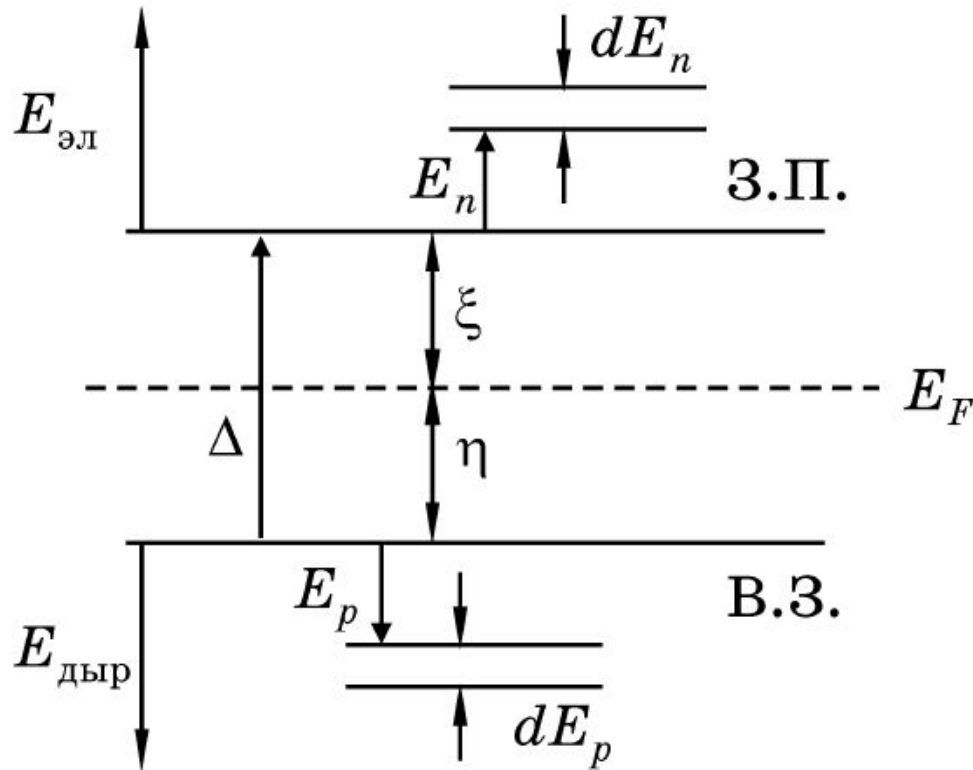
## §1 Физические свойства полупроводников.

*План:*

- 1. Собственные полупроводники. Уровень Ферми.*
- 2. Примесные полупроводники.*
- 3. Электропроводность полупроводников.*
- 4. Полупроводниковые приборы (*n-p* – переход, прохождение тока через *n-p* – переход, туннельные диоды, транзисторы). (самостоятельно)*
- 5. Аморфные (стеклообразные) полупроводники. (самостоятельно)*
- 6. Полупроводниковые структуры пониженной размерности. (самостоятельно)*

# 1. Собственные полупроводники. Уровень Ферми

$T = 0 \text{ К}$        $\Delta \sim 1 \text{ эВ}$        $kT = 0,025 \text{ эВ}$        $\frac{\Delta}{kT} \gg 1$



$\eta + \xi = \Delta$        $N_n$        $E_n$   
 $d\Gamma = d^3p d^3x$        $\int d^3x = V$

*К расчету плотности  
 электронов и дырок  
 в полупроводнике*

# 1. Собственные полупроводники.

## Уровень Ферми

$$N_n = 2 \int \frac{d\Gamma}{(2\pi\hbar)^3} \exp\left(-\frac{(\xi + E_n)}{kT}\right) = \quad (1)$$
$$= \frac{2V}{(2\pi\hbar)^3} \int 4\pi p_n^2 dp_n \exp\left(-\frac{(\xi + E_n)}{kT}\right)$$

$$m^* \quad p_n^2 = 2m^* E_n \quad p dp = m^* dE_n$$

$$n_n = \frac{N_n}{V} = \frac{8\pi}{(2\pi\hbar)^3} \int_0^\infty \sqrt{2m^* E_n} m^* dE_n \exp\left(-\frac{(\xi + E_n)}{kT}\right) = \quad (2)$$
$$= \frac{\sqrt{2}(m^*)^{\frac{3}{2}}}{\pi^3 \hbar^3} \exp\left(-\frac{\xi}{kT}\right) \int_0^\infty \sqrt{E_n} \exp\left(-\frac{E_n}{kT}\right) dE_n.$$

# 1. Собственные полупроводники.

## Уровень Ферми

$$y = \frac{E_n}{kT} \left[ \frac{\sqrt{2} m_n^{*3/2} (kT)^{3/2}}{\pi^2 \hbar^3} \int_0^\infty \sqrt{y} \exp(-y) dy \right] \exp\left(-\frac{\xi}{kT}\right) \quad (3)$$

$$\int_0^\infty \sqrt{y} \exp(-y) dy = \frac{\sqrt{\pi}}{2}$$

$$n_n = \frac{\sqrt{2} (m_n^* kT)^{3/2}}{2\pi^2 \hbar^3} \sqrt{\pi} \exp\left(-\frac{\xi}{kT}\right) = \quad (4)$$
$$= \frac{2}{\hbar^3} \left(\frac{m_n^* kT}{2\pi}\right)^{3/2} \exp\left(-\frac{\xi}{kT}\right) = Q_n \exp\left(-\frac{\xi}{kT}\right)$$

$$Q_n = \frac{2}{\hbar^3} \left(\frac{m_n^* kT}{2\pi}\right)^{3/2} = 2,5 \cdot 10^{19} \left(\frac{m_n^*}{m_e}\right)^{3/2} \left(\frac{T}{293}\right)^{3/2} \text{см}^{-3} \quad (5)$$

# 1. Собственные полупроводники.

## Уровень Ферми

$$n_p = \frac{2}{\hbar^3} \left( \frac{m_p^* kT}{2\pi} \right)^{\frac{3}{2}} \exp\left(-\frac{\eta}{kT}\right) = Q_p \exp\left(-\frac{\eta}{kT}\right) \quad (6)$$

$$n_n = n_p \quad \eta - \xi = kT \ln \frac{Q_p}{Q_n} = \frac{3}{2} kT \ln \frac{m_p^*}{m_n^*} \quad (7)$$

$$\eta - \xi \ll 1 \quad \eta \cong \xi$$

$$n_n n_p = Q_n Q_p \exp\left(-\frac{\Delta}{kT}\right) \quad (8) \quad \eta + \xi = \Delta$$

$$n_i = n_n = n_p = \sqrt{Q_n Q_p} \exp\left(-\frac{\Delta}{2kT}\right) \quad \text{или} \quad n_n n_p = n_i^2 \quad (9)$$

## 2. Примесные полупроводники

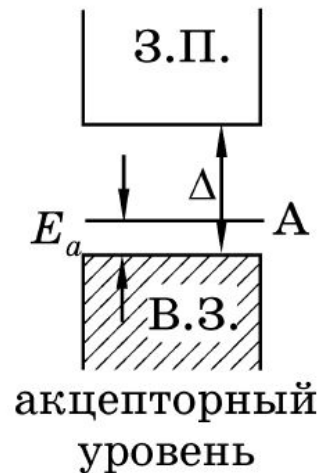
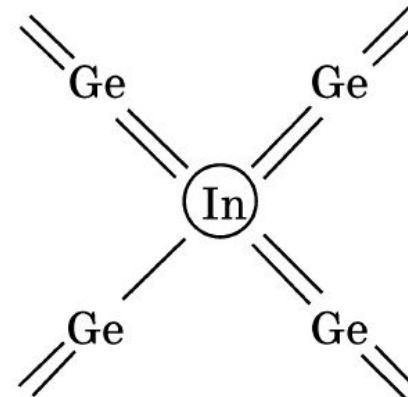
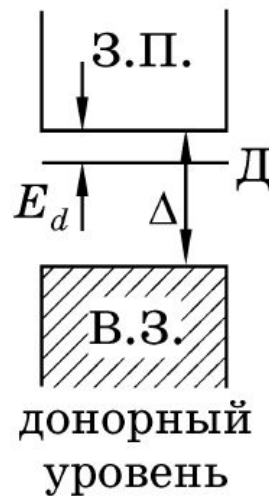
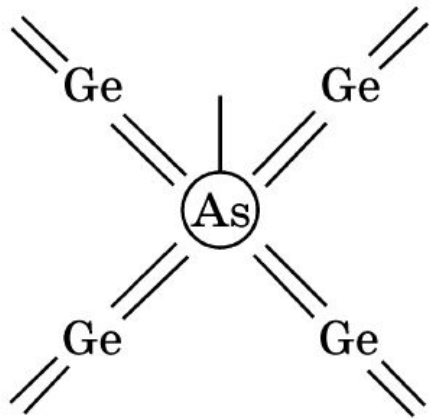
$10^{-5}$  увеличивает проводимость в 1000 раз Ge и Si

P, As, Sb

B, Al, Ga, In

*a*

*б*



*Примесные атомы и энергетические схемы:*

*a* — пятивалентный мышьяк; *б* — трехвалентный индий в решетке германия

## 2. Примесные полупроводники

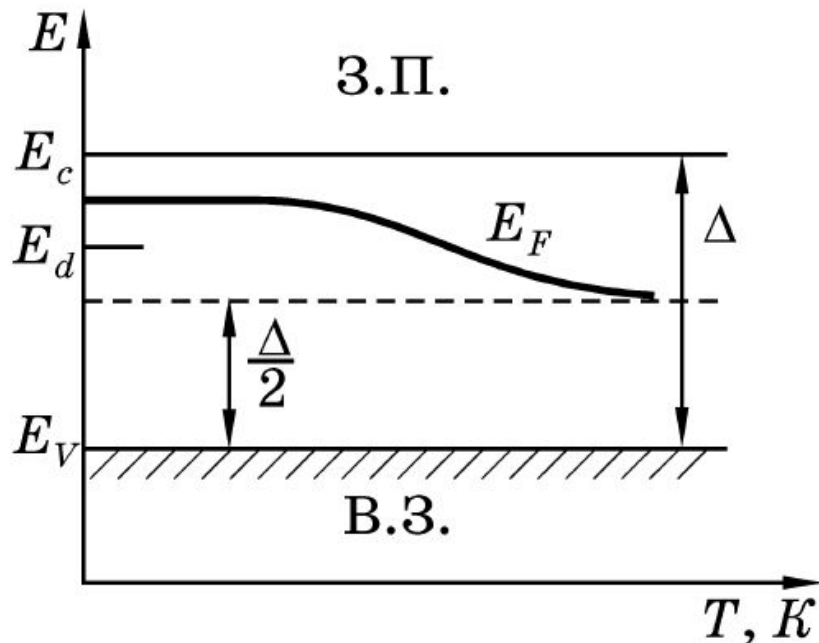
$$\varphi = \frac{e}{\epsilon r} \quad m^* = 0,12m \quad \epsilon = 16 \quad Z = 1$$

$$E_1 = \frac{me^4}{2\hbar^2} \frac{m^*}{m\epsilon^2} \text{ эВ} \cong 0,006 \text{ эВ} \quad (10)$$

$$r_1 = \frac{\hbar}{me^2} \frac{m\epsilon}{m^*} \cong 80 \text{ \AA} \quad (11)$$

$$T \sim 0 \quad E_F \sim \frac{E_d}{2} \quad \frac{\Delta}{2}$$

$$p\text{-типа} \quad \frac{E_a}{2} \quad \sim \frac{\Delta}{2}$$



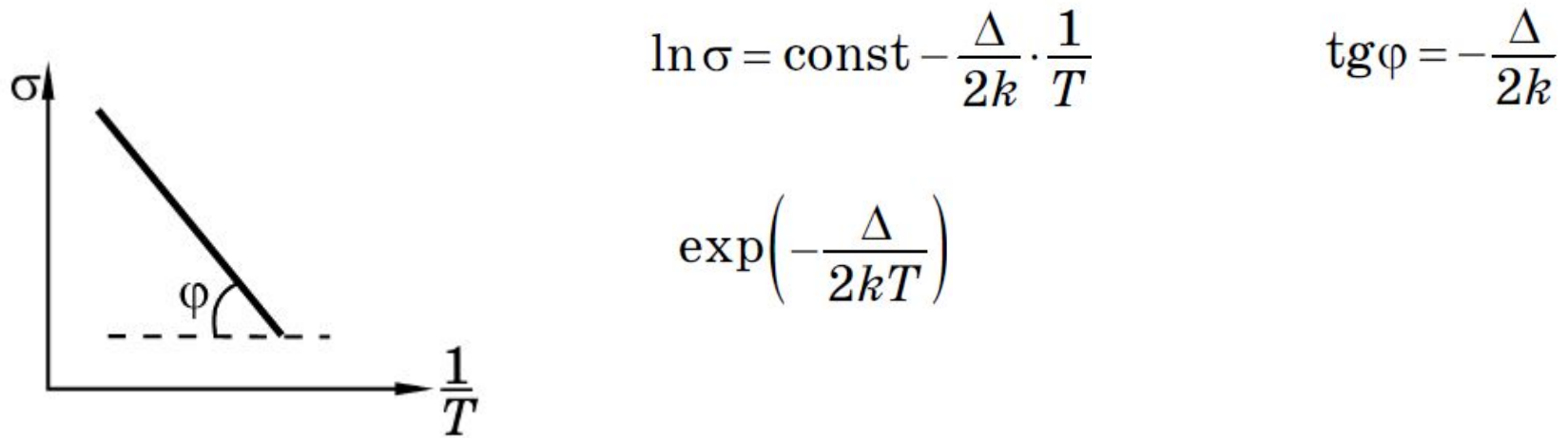
Зависимость энергии Ферми  $E_F$  от температуры для полупроводника n-типа

### 3. Электропроводность полупроводников

$$\sigma = \frac{j}{E} = |e|(n_n \mu_n + n_p \mu_p) \quad (12)$$

$$n_n = n_p = \sqrt{Q_n Q_p} \exp\left(-\frac{\Delta}{2kT}\right)$$

$$\sigma = |e| \sqrt{Q_n Q_p} (\mu_n + \mu_p) \exp\left(-\frac{\Delta}{2kT}\right) = A \exp\left(-\frac{\Delta}{2kT}\right) \quad (13)$$



Зависимость электропроводности в собственном полупроводнике от температуры, построения в координатах  $\ln \sigma$  от  $\frac{1}{T}$



### 3. Электропроводность полупроводников

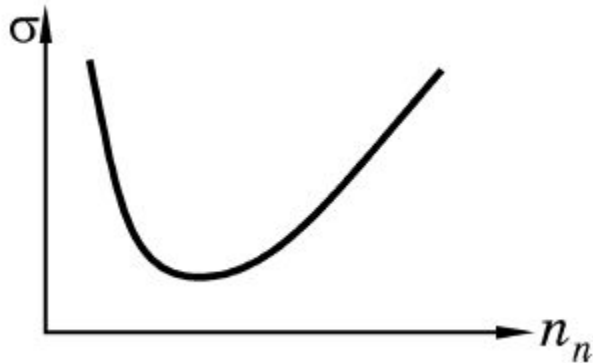
$$n_p = \frac{n_i^2}{n_n} \quad \frac{d\sigma}{dn_n} = e^2 \left( \frac{\tau_n}{m_n^*} - \frac{n_i^2}{n_n^2} \frac{\tau_p}{m_p^*} \right), \quad \frac{d^2\sigma}{dn_n^2} = 2e^2 \frac{n_i^2 \tau_p}{n_n^3 m_p^*} \quad (14)$$

$$\sigma = \sigma(n_n) \quad \frac{d\sigma}{dn_n} = \frac{\tau_n}{m_n^*} - \frac{n_i^2}{n_n^2} \frac{\tau_p}{m_p^*} = 0 \quad (15)$$

$$\frac{n_i^2}{n_n} = n_p$$

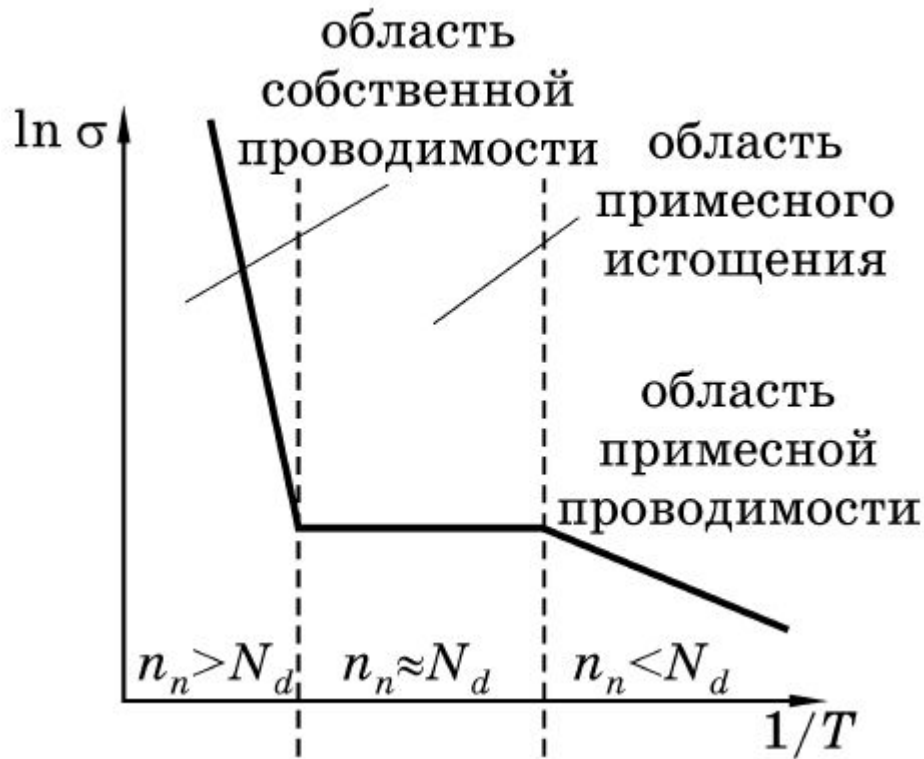
$$\frac{n_p}{n_n} = \frac{\tau_n m_p^*}{\tau_p m_n^*} = \frac{\mu_n}{\mu_p} \quad (16)$$

$$n_n = n_p$$



Зависимость удельной проводимости примесного полупроводника от концентрации электронов

### 3. Электропроводность полупроводников



$$n_n \approx N_d$$

Зависимость  $\ln \sigma$  от  $\frac{1}{T}$  для полупроводника *n*-типа